

Luxembourg  
7-8 juillet 2011

## NOUVEAUX SYSTÈMES DE MURS ISOLANTS EN BÉTON

S. Agaajani, D. Waldmann

Laboratory of Solid Structures – Université du Luxembourg, G.-D. de Luxembourg

**RÉSUMÉ :** Les blocs de construction avec des systèmes d'emboîtement sans l'utilisation de mortier ont un effet bénéfique multiple. La rapidité, la simplicité et la précision de pose apportent une économie considérable dans la main-d'œuvre, matières premières ainsi que la propreté sur chantier. Les blocs conçus par les laboratoires LCS sont constitués de deux plaques verticales en béton, reliées entre elles par l'intermédiaire de traverses en béton. Les premiers essais sur les éléments de maçonnerie donnent des résultats engageants avec une résistance ultime de plus de 40 MPa/m, avec un béton de haute résistance C50/55. Des essais sur des murs en grandeur réelle sont en cours de réalisation, conformément aux règlements et normes de l'EC6, et doivent encore affirmer leur compétitivité par rapport aux murs traditionnels existants sur le marché. La configuration des blocs permet l'amélioration des performances thermo-acoustiques des murs, par l'introduction d'isolants thermiques, telles que la cellulose ou autres matériaux pouvant être mis en place par soufflage.

### 1. STRUCTURE DES BLOCS DE BÉTON

L'objectif est de créer un bloc de béton à la fois performant d'un point de vue thermique tout en gardant une grande résistance thermique. A priori, l'optimisation d'un paramètre se fera en dépit de l'autre, et un compromis doit être trouvé. Le premier module développé aux laboratoires LCS, est constitué de deux plaques de béton, qui sont reliées l'une à l'autre par l'intermédiaire de connexions transversales en béton. Les parties creuses sont remplies de polystyrène expansé, de sorte que le bloc fasse 200 mm d'épaisseur.

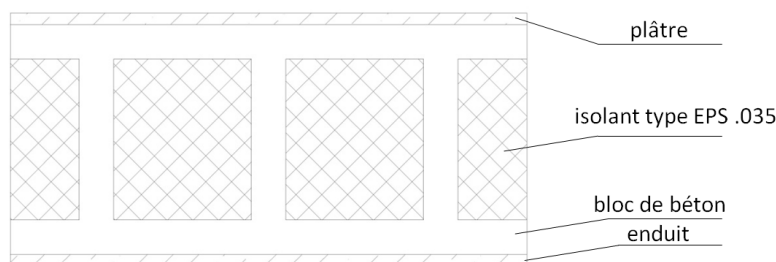


Figure 1. Section d'un bloc de béton.

Le béton utilisé est de type béton auto-plaçant avec une conductivité de 2,0 W/m.K ; l'isolant utilisé se caractérise par une conductivité de 0,035 W/m.K.

## 1.1 Comportement thermique

L'étude des transferts thermiques fait intervenir les concepts de quantité de chaleur et de différence de température et on distingue trois mécanismes de transmission de chaleur : conduction, convection et le rayonnement thermique. En pratique, l'étude d'un cas donné sera une combinaison des ces trois types de transferts thermiques. Dans un souci de simplification des calculs analytiques, seul les deux premiers mécanismes sont pris en compte dans la présente étude

En supposant les deux parois du bloc isothermes et un flux thermique permanent, l'équation de la transmission de chaleur se ramène à une conduction stationnaire en régime permanent sur un modèle plan (Buchlin, 2006) :

$$\frac{d}{dx} \left( \lambda \frac{dT}{dx} \right) = 0 \quad (1)$$

La résolution de cette équation permet de tracer le profil de température à l'intérieur du bloc étudié (parties linéaires Figure 2). Les échanges thermiques extérieurs sont considérées avoir lieu sur une lame d'air de 10 mm d'épaisseur (partie courbe Figure 2).

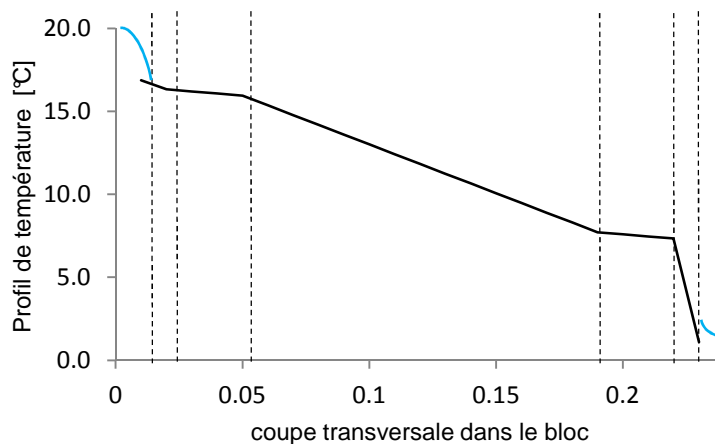


Figure 2. Profil de température de l'intérieur (20°C) vers l'extérieur (0°C). Composition : air<sub>int</sub>-plâtre-plaque-traverse/isolant-plaque-enduit-air<sub>ext</sub>.

La détermination des pertes calorifiques à travers le bloc réside dans l'application de la théorie des circuits électriques et la résistance thermique totale est égale à :

$$R_{th} = \frac{1}{h_i} + \frac{e_A}{\lambda_A} + \frac{e_B}{\lambda_B} + \left[ \frac{e}{(\alpha\lambda_C + \beta\lambda_D)} \right] + \frac{e_F}{\lambda_F} + \frac{e_G}{\lambda_G} + \frac{1}{h_e} \quad \left[ \frac{m^2.K}{W} \right] \quad (2)$$

Les paramètres suivants ont été pris en compte : conductivités plâtre  $\lambda_A=0,45$  ; béton  $\lambda_B=\lambda_D=\lambda_F=2,00$  ; isolant  $\lambda_C=\lambda_E=0,035$  ; enduit  $\lambda_G=0,04$  W/mK ; une convection extérieure  $h_e = 23$  et intérieure  $h_i = 8$  W/m<sup>2</sup>.K ; les proportions isolant-béton à l'intérieur du bloc est définie par  $\alpha = 0,8$  ;  $\beta = 0,2$ .

Et le coefficient de transfert de chaleur global est :

$$U = \frac{1}{R_{th}} \quad \left[ \frac{W}{m^2.K} \right] \quad (3)$$

Ce module présente une résistance thermique totale de 0,80 m<sup>2</sup>.K/W, soit une valeur U de 1,25 W/m<sup>2</sup>.K. Les nouveaux règlements énergétiques au Luxembourg exigent une valeur maximale de 0,32 W/m<sup>2</sup>.K de déperditions de chaleur à travers les murs extérieurs. Pour répondre à cette demande, plusieurs solutions sont proposées sur le marché, comme la façade isolante renforcée, les blocs de béton légers ou bloc isolants et les murs doubles avec isolant et lame d'air ventilée.

Afin de comprendre le comportement thermique des murs à bloc de béton emboîtables, tous les paramètres sont étudiés analytiquement afin d'en déduire leur influences ainsi que les optimisations possibles.

#### 1.1.1 Influence des différentes propriétés des blocs de béton

Lorsque les blocs sont utilisés sans isolation extérieure supplémentaire, les traverses constituent des points thermiques faibles, ou en général des ponts thermiques, et leur nombre ainsi que leurs surfaces de contact sont à limiter sans pour autant réduire la résistance mécanique du mur. On serait ainsi amené à vouloir éliminer les traverses pour réduire de façon logarithmique les déperditions de chaleur à travers le mur. Néanmoins, dans le présent exemple le bloc en question est constitué de deux plaques porteuses de 2x30 mm d'épaisseur et la réduction du nombre de traverses a un impact négatif sur l'élancement du mur et diminue fortement sa stabilité.

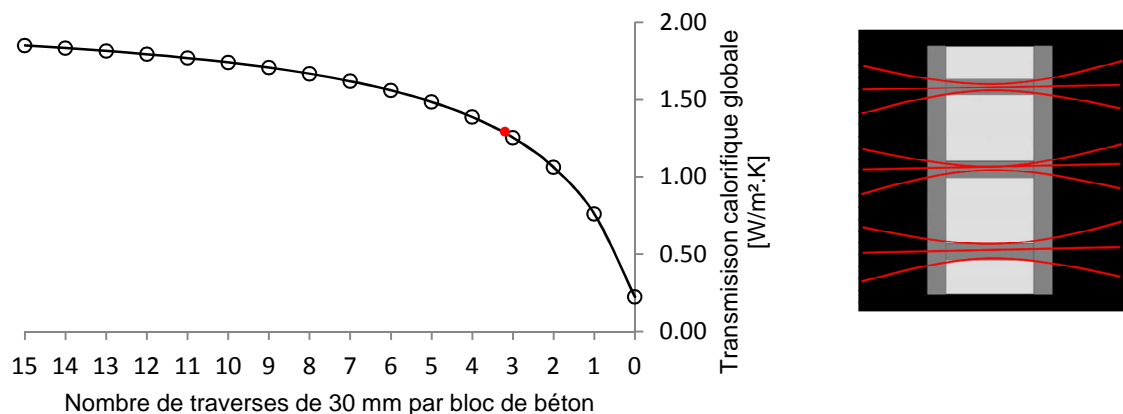


Figure 3. Approche analytique pour la détermination de l'influence des traverses sur le transfert calorifique du bloc. Visualisation des ponts thermiques.

Une harmonie est également à trouver pour l'épaisseur des plaques extérieures du bloc puisqu'elles sont non seulement responsables de la descente des charges, mais également des déperditions calorifiques. Ainsi, pour l'exemple en question, les déperditions de chaleur varient de manière quasi linéaire en fonction de l'épaisseur des plaques extérieures.

$$U \cong k \cdot e_p + cte \left[ \frac{W}{m^2.K} \right] \quad (4)$$

Où  $e_p$  est l'épaisseur des plaques extérieures en [m],  $k$  la pente de la droite en  $\left[ \frac{W}{m^2.K} / m \right]$  égale à 8,04 pour l'exemple en question, et  $cte = 1,00 \left[ \frac{W}{m^2.K} \right]$  avec un coefficient de corrélation égal à  $R^2=0,985$ .

La variation de la transmission de chaleur, due à un changement de l'épaisseur des plaques extérieures est définie dès lors par :

$$\frac{dU}{de_p} = k \left[ \frac{W}{m^2.K} / m \right] \quad (5)$$

Cela revient à dire que la transmission de chaleur varie de 8,04 W/m<sup>2</sup>.K par mètre, soit 0,08 W/m<sup>2</sup>.K par centimètre d'épaisseur des plaques porteuses. Il s'agit d'une quantité relativement importante vue que la différence entre un mur d'un bâtiment de type basse énergie et passif n'est que de 0,05 W/m<sup>2</sup>.K. La descente des charges se faisant principalement à travers ces plaques extérieures, leurs sections sont déterminantes pour la capacité portante des murs. Un compromis doit forcément être trouvé en fonction de la classe de résistance mécanique recherchée.

D'autre part, en augmentant l'épaisseur de la couche d'isolation intérieure, le comportement thermique est amélioré, mais cette amélioration est beaucoup plus significative lorsqu'une isolation extérieure supplémentaire est appliquée. Celle-ci a la capacité de couper les ponts thermiques que constituent les traverses. Sur la figure 4 on voit que le comportement thermique du bloc peut empreindre des chemins différents en partant des mêmes conditions initiales. Le premier chemin est celui où l'épaisseur de l'isolant intérieur est augmentée, sans façade isolante extérieure. Le deuxième chemin est celui où l'épaisseur de l'isolant intérieur reste constante, et une façade isolante extérieure est rajoutée.

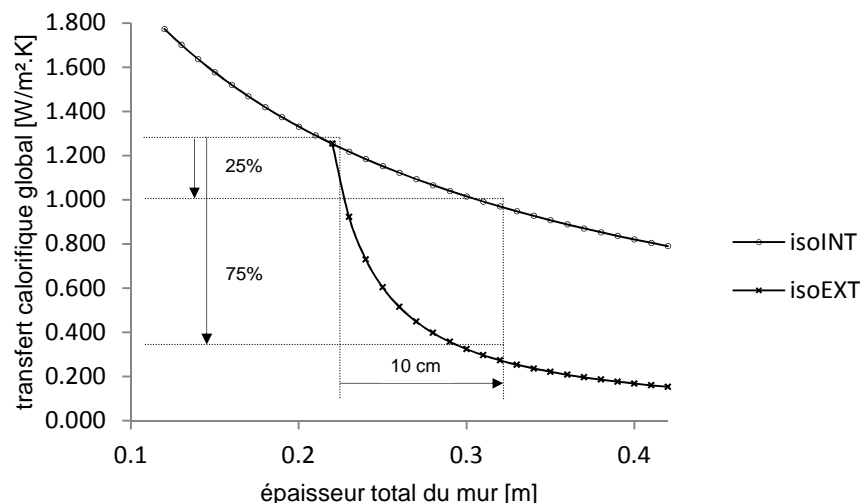


Figure 4. Effet d'une isolation intérieure et extérieure au bloc. Conductivité des isolants : 0,035 W/m.K

Nous constatons qu'une couche d'isolation extérieure de 10 cm diminue le transfert thermique de près de 75%, alors que l'effet n'est que de 25% avec une même surépaisseur d'isolation intérieure, ainsi que la diminution est la plus conséquente sur les quelques premiers 6 cm de matière isolant extérieur.

De même, la figure 5 montre la différence de transmission de chaleur entre la non-présence et la présence d'une isolation intérieure, et en fonction de l'isolation extérieure. Nous constatons qu'en absence d'une isolation extérieure (intersection avec l'axe des ordonnées), les déperditions calorifiques d'un bloc avec isolation intérieure sont nettement moindres ( $\sim 0,9 \text{ W/m}^2\text{K}$ ). Cette différence garde sa portée jusqu'une isolation extérieure allant de 5 à 8 cm ; au-delà de cette épaisseur de façade isolante, l'effet de l'isolation intérieure se fait de moins en moins ressentir pour devenir négligeable après une isolation extérieure de 12 à 14 cm.

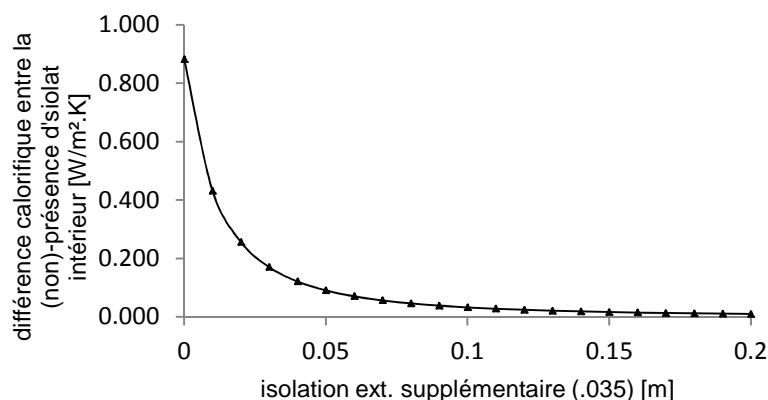


Figure 5. Le gain énergétique entre un bloc avec et isolation intérieure en fonction d'une couche d'isolation extérieure

Afin de respecter des exigences énergétiques élevées ( $U = 0,20 \text{ W/m}^2\text{K}$  et inférieures) dans le cadre de ce type de bloc, il est plus économique d'appliquer une façade isolante extérieure ( $\geq 12 \text{ cm}$ ). Dans ce cas, l'isolation intérieure n'apporte théoriquement que peu d'intérêt d'un point de vue thermique, mais a toutefois la faculté de bloquer la convection thermique à l'intérieur du mur.

#### 1.1.2 Influence du type de béton utilisé dans les blocs de béton

Le type de béton utilisé pour le bétonnage des blocs joue un rôle important d'un point de vue mécanique et thermique. Sur la Figure 6 nous percevons la transmission de la chaleur à travers un second bloc développé, à deux traverses, en fonction de la conductivité du béton. Nous retrouvons une transmission de chaleur de  $1,10 \text{ W/m}^2\text{K}$  pour une conductivité de  $2,00 \text{ W/m.K}$ . Cette valeur se réduit à  $0,30 \text{ W/m}^2\text{K}$  pour une conductivité de  $0,20 \text{ W/m.K}$ . Vu le grand effet bénéfique d'un point de vue thermique, il est crucial de choisir un béton de faible conductivité. Cet effet est également économique car la transmission calorifique est diminuée sans coût supplémentaires (travaux de façade extérieure).

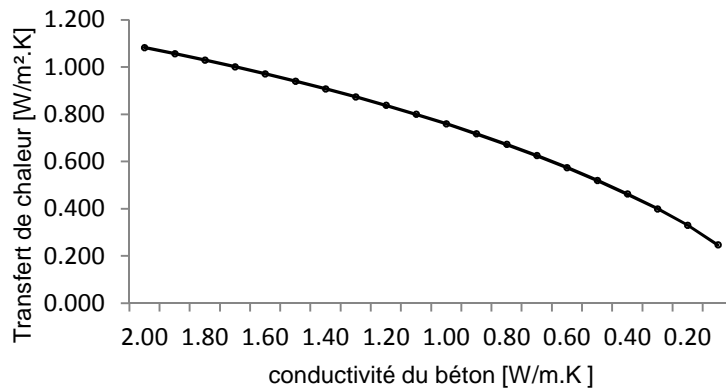


Figure 6. Evolution de la transmission de chaleur à travers le bloc en fonction de la conductivité/type de béton utilisé. Remarque : calculs réalisés sans isolation extérieure.

En pratique, il sera important de trouver un compromis entre la performance thermique souhaitée et la classe résistance mécanique des blocs. L'optimisation de la construction, tant d'un point de vue économique, thermique et mécanique dépendra du type de la construction (charges d'exploitation, fonction) ainsi que la performance énergétique souhaitée.

## 2. EMBOITEMENT DES ELEMENTS

L'intention d'utiliser des systèmes de murs à emboîtement sans l'utilisation de mortier tient un effet bénéfique multiple. La rapidité, la simplicité et la précision de pose apportent une économie de main-d'œuvre, de matières premières ainsi que la propreté sur chantier. D'autant que cela reste valable avec une main-d'œuvre peu expérimentée.

Le système d'emboîtement est assuré par les parties mâles et femelles des blocs, empêchant les translations sur le plan horizontal.

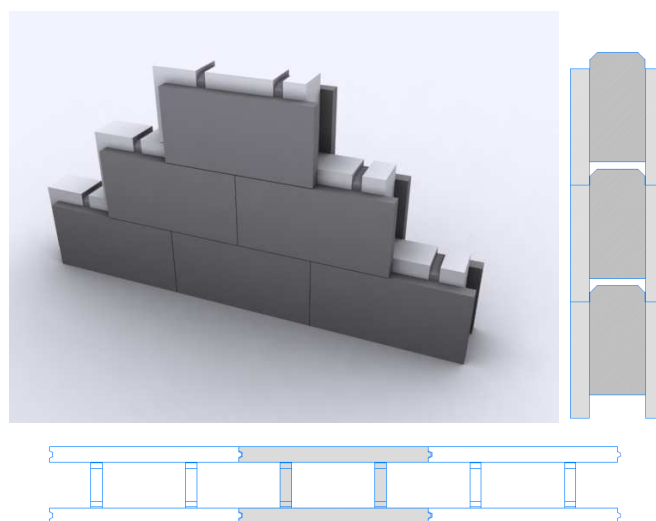


Figure 7. Blocs emboîtés horizontalement et verticalement.

La précision de pose des blocs sera fonction de la planéité de leurs faces de contact. Traditionnellement, le mortier est utilisé pour assurer notamment la planéité des rangs de blocs ainsi que la transmission uniforme des charges. D'ailleurs, le mortier ne rigidifie pas les murs en maçonnerie et ne participe pas dans la résistance totale du mur. Pour que ce type de système de mur puisse être mis en application, il est indispensable d'assurer une tolérance minimale à respecter durant la production dans les usines.

### 3. COMPORTEMENT MÉCANIQUE DES BLOCS

#### 3.1 Tolérances de fabrication des blocs de béton

Le béton utilisé lors de la fabrication des blocs, est du type C50/55. La mise en compression du bloc se faisant exclusivement par l'intermédiaire des plaques verticales extérieures, la surface de contact est de  $2 \times 0,02 \text{ m}^2$  par unité de bloc. Les premiers blocs étant fabriqués artisanalement par l'intermédiaire de coffrages en bois, les tolérances de production doivent être surveillées.

Pour les essais, après mesurage de tous les blocs de béton produits, un sous-ensemble présentant de relativement bonnes caractéristiques dimensionnelles a été retenu :

	Hauteur [mm]	Largeur [mm]	Longueur [mm]	Ép. Plaque inf. [mm]	Ép. Plaque sup. [mm]	Poids [kg]
Valeur Max.	252,3	201,2	501,0	40,7	42,2	28,7
Valeur Min.	249,5	198,0	498,4	39,6	38,1	27,7
Moy. générale	250,8	199,6	500,1	40,2	40,5	28,2
Médiane	250,9	199,8	500,2	40,1	40,6	28,2
Écart-type S	0,71	0,82	0,60	0,34	0,85	0,23

Tableau 1. Statistiques de production des blocs de béton. Nombre d'éléments n=20.

Les exigences relatives aux éléments de maçonnerie peuvent être spécifiées conformément à l'EN 771-3 correspondants aux éléments de maçonnerie en béton de granulats. Les valeurs des proportions du corps cible des blocs nous permettent ainsi d'identifier la classe de tolérance, de D1 (grande tolérance) à D4 (petite tolérance).

A noter que les éléments de maçonnerie collés par l'intermédiaire de mortier à joint mince, doivent correspondre au moins aux classes D3 ou D4. Quant aux blocs de maçonnerie sans l'utilisation de mortier, il n'existe pas de normes, mais il est évident qu'une grande précision de fabrication est essentielle. Dans la présente étude, le sous-ensemble de blocs de béton produits (Tableau 1) est de classe D1 dans la hauteur et largeur et seulement de D4 dans la longueur. Egalement à prendre en considération, l'épaisseur des surfaces de contact entre les blocs : toute discontinuité provoque la diminution l'épaisseur efficace des plaques porteuses (voir figure 12). Ces points constituent une faiblesse générale pour la structure, et la classe de tolérance doit être nettement améliorée par un post-traitement des blocs. Ce traitement peut être un fraisage des surfaces de contact afin d'assurer leur planéité.

#### 3.2 Comportement d'un seul élément soumis à une compression verticale simple

Afin de comprendre le comportement mécanique d'un seul élément de maçonnerie et de déterminer sa capacité portante, un essai de compression simple est réalisé (figure 8). L'état ultime des demi-blocs se caractérise par une rupture fragile avec éclatement complet de l'élément de maçonnerie. La

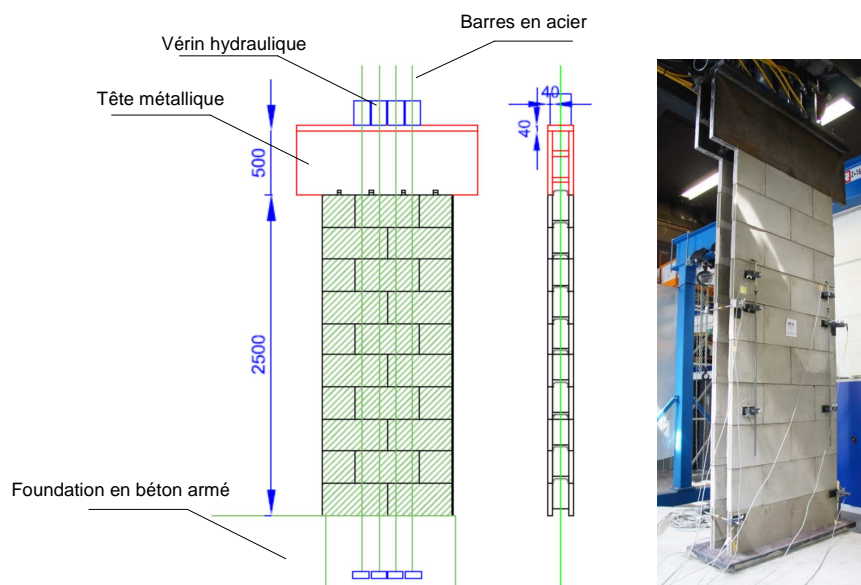
limite est atteinte avec un effort de l'ordre de 850 kN et une résistance ultime de plus 42 MPa. A noter que les surfaces inférieures et supérieures étaient traitées, parfaitement lisses et parallèles. Cette résistance est supérieure de l'ordre de 3 fois par rapport aux éléments de maçonnerie traditionnels existants sur le marché, et même 15 fois par rapports aux blocs isolants.



Figure 8. Essai sur un bloc de béton par l'intermédiaire de vérins hydrauliques

### 3.3 Comportement d'un mur de blocs de béton

En général, la hauteur libre entre deux niveaux d'un bâtiment est fixée par le règlement des bâtisses de la commune, et la hauteur minimale varie entre 2,20 et 2,50 m. Afin d'étudier la perte de résistance en compression due à un problème de stabilité et aux imperfections du système, un mur de 2,50 m de haut et 1,00 m de large a été monté sur une fondation en béton par la simple pose des blocs de béton sans l'utilisation de mortier ni d'élastomères, afin d'étudier son comportement mécanique. Des vérins hydrauliques exercent un effort vertical, allant jusqu'à une valeur maximale de 2400 kN, sur la structure et la distribution des charges est assurée par une tête métallique de 500 mm de haut, considérée comme étant infiniment rigide.





Figures 9. Système de mise en charge par 8 vérins hydrauliques sur une fondation en béton armé servant de base pour l'encreage des barres métalliques tendues par les vérins hydrauliques.

Pour cet essai, et contrairement à qui est suggéré dans le paragraphe 3.1, les éléments de maçonnerie n'ont pas subi de traitement pour l'amélioration des propriétés géométriques des blocs, et sont gardés dans leur état brut de sortie des usines. La relativement grande différence de hauteurs et d'épaisseurs relatives des blocs, implique que les surfaces de contact sont ponctuelles et non-uniformes. En conséquence, une descente de charge homogène ne peut avoir lieu et la résistance maximale à l'état limite ultime ne peut être atteinte.

Des jauges de déformations installées de part et d'autre du mur, conformément aux normes EN 1052-1 pour la détermination de la résistance caractéristique à la compression de la maçonnerie, mesurent le rétrécissement du mur en fonction de la contrainte extérieure appliquée.

Sur la Figure 10, un comportement élastique se caractérisant par un module de Young de 12000 MPa est distingué (1-2), suivant d'un comportement élasto-plastique avec un module de 1500 MPa (2-3). En raison des surfaces de contact ponctuelles entre les éléments de maçonnerie, les blocs entrent prématurément en fissuration et la stabilité du mur est assurément réduite. Ce sont d'abord les traverses qui entrent en fissuration suivies des plaques extérieures. Il en résulte une déstabilisation générale de la structure. Ne connaissant pas la réponse de la structure ni sa limite de résistance, le mur est déchargé afin de retirer les équipements de mesure (3-4) et puis rechargé jusqu'à son état limite ultime (4-3-5). L'état ultime se caractérise par l'arrachement d'une série de plaques extérieures (Figure 11) des traverses auxquelles elles sont reliées. La capacité ultime du mur, sans post-traitement des blocs de béton n'atteint dès lors que 4,5 MPa.

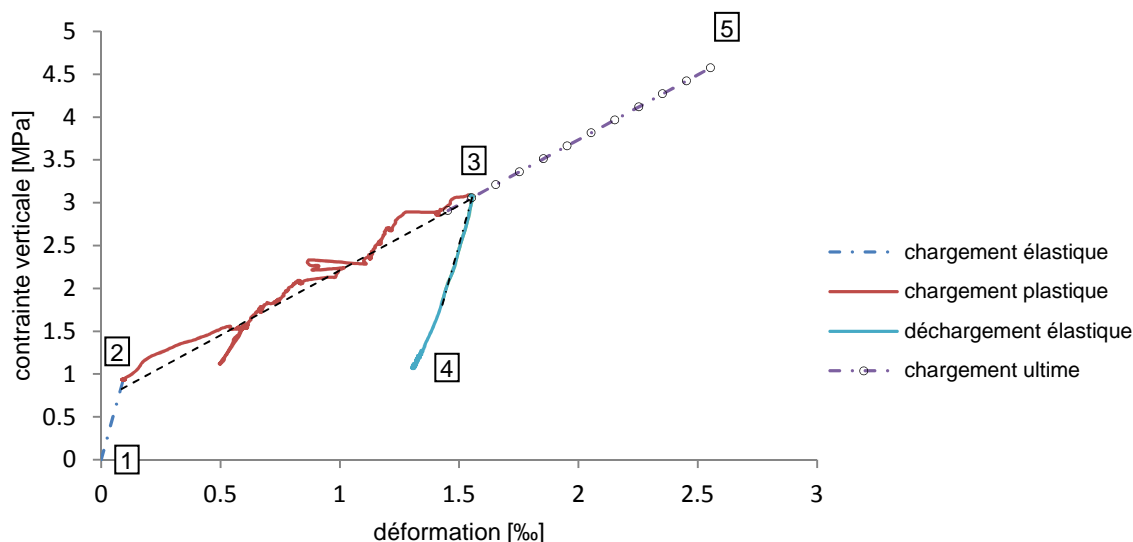


Figure 10. Évolution de la contrainte verticale en fonction de la déformation du mur.



Figures 11. Etat limite ultime du mur en bloc de béton.

La fissuration ainsi que la déstabilisation précoce du mur (4,5 au lieu des 42 MPa pour un bloc) résulte principalement des imperfections des éléments énoncées ci-dessus. S'ajoute à cela l'élancement du mur (hauteur du mur 2,50 m pour une épaisseur de 0,20 m) relativement élevé de 12,5, par rapport à un simple bloc de béton uniformément comprimé. De plus, les zones de perturbation à la base et tête du mur sont distinctes et éloignées, de sorte qu'il existe une zone intermédiaire avec une répartition uniaxiale des contraintes de compression. A noter également que l'épaisseur efficace des plaques extérieures est réduite (figure 12). La capacité portante du mur étant en étroite liaison avec la surface des plaques extérieures, toute réduction de cette surface implique directement une diminution de la résistance du mur.



Figure 12. Epaisseur efficace des plaques extérieures et surfaces de contact ponctuelles non uniformes.

#### 4. CONCLUSION

Ces calculs et modèles analytiques permettent d'étudier le comportement thermique des blocs sous différents aspects : influence des traverses, de l'épaisseur des plaques extérieures, de la variation des épaisseurs des isolants intérieurs et extérieurs, de la (non)-présence de l'isolant intérieur, ainsi que du type de béton utilisé. Le « réglage thermique » du bloc, implique un changement du comportement mécanique. Le nombre de traverses, les épaisseurs des plaques et le type de bétons utilisés agissent sur la résistance du matériau et il faut veiller à trouver un compromis entre le degré de protection thermique souhaité et la classe de résistance mécanique nécessaire pour la construction. Néanmoins, nous pouvons conclure que l'effet d'une isolation intérieure au bloc est intéressant dans la mesure où la classe énergétique (définie selon la directive européenne 2002/91/EG du 12 décembre 2002) ciblée n'est pas trop élevée ( $>D$ ). Pour les classes énergétiques élevées, c.-à-d. les enveloppes des bâtiments de classe BBB, AAA, et meilleur, il sera nécessaire d'isoler avec une façade isolante supplémentaire extérieure. Celle-ci détient la propriété de bloquer les ponts thermiques que constituent les traverses des blocs. De plus, elle est plus performante qu'une augmentation de

l'épaisseur d'une isolation intérieure au bloc. Rappelons qu'une couche isolante extérieure de 12 cm rend la fonction de l'isolant intérieur au bloc nettement moins important d'un point de vue thermique. D'un point de vue résistance des matériaux, la surface de contact entre les éléments de maçonnerie joue un rôle déterminant lorsqu'un joint de mortier ou élastomère n'est pas mis en place. Les surfaces de contact doivent être parfaitement lisses et planes et les dimensions des différents éléments doivent être telle que leur classe de tolérance soit D4.

## **5. PERSPECTIVES**

Ayant acquis les connaissances de base pour la réalisation de murs en bloc de béton sans l'utilisation de mortier, l'amélioration du comportement mécanique des murs sera recherchée par la suite. Un élastomère sera posé entre les éléments de maçonnerie afin de pouvoir négliger les imperfections actuelles de fabrication et de vérifier l'influence d'une configuration de bloc donnée. Les effets de la réduction de la résistance seront recherchés et raffinés, en déterminant la résistance d'un seul bloc à partir de la résistance en compression du béton utilisé, ainsi la résistance d'un mur à hauteur variable à partir de la résistance d'un bloc seul. Un post-traitement des blocs sera développé afin d'assurer une tolérance de dimensions minimale, nous permettant de travailler avec les blocs sans mortier ni élastomères. La résistance ultime de la structure peut ainsi être obtenue et le type de béton pourra être choisi en fonction de la résistance mécanique recherchée et la performance thermique imposée. L'intégration de matériaux à changement de phase, le choix de façade isolants, ainsi que l'analyse de cycle de vie des différents matériaux seront pris en compte afin d'optimiser le système de mur d'un point de vue thermique, mécanique, écologique et économique.

## **REMERCIEMENTS**

Nous remercions la société Chaux de Contern S.A. pour le financement et la production des blocs de béton dans leur usines. De même grâce à la compétence et l'aide des techniciens et ingénieurs de laboratoires de l'UL, ces essais n'auraient pas pu être préparés et réalisés en si peu de temps.

## **RÉFÉRENCES**

BUCHLIN, J.-M. (2006) Phénomènes de transport, Université Libre de Bruxelles, Belgique  
NORMES EN 1996-1-2006 (F) Calcul des ouvrages en maçonnerie. Règles générales pour ouvrages en maçonnerie armée et non armée ; CEN Comité Européen de Normalisation ; Résistance caractéristique à la compression.  
NORMES EN 771-3 :2003 (F) Partie 3: Eléments de maçonnerie en béton de granulats (granulats courants et légers); Version allemande EN 771-3:2003 + A1:2005.